

Efeito das nervuras dos varões de aço na aderência de zonas de ligação



Ana Sofia Louro

Bolseira de Investigação
LNEC
Lisboa
analouro@lnec.pt



Manuel Pipa

Investigador Principal
LNEC
Lisboa
mpipa@lnec.pt

SUMÁRIO

Numa primeira parte, o presente trabalho sistematiza a influência do perfil nervurado dos varões de aço na aderência de zonas de ligação evidenciando em que medida este parâmetro controla o desempenho dos elementos de betão armado ao nível dos estados limite últimos e de utilização e ainda nas zonas de amarração e emenda de varões.

Posteriormente apresentam-se os resultados mais relevantes obtidos num programa experimental desenvolvido no LNEC com o objetivo de caracterizar a aderência dos varões nervurados do tipo A500 NR SD existentes no mercado, fundamentalmente para melhorar a modelação do comportamento dos elementos de betão armado de zonas críticas de estruturas inseridas em zonas sísmicas.

Os resultados obtidos quer nos ensaios monotónicos quer nos ensaios cíclicos apontam para que o aumento da área relativa das nervuras transversais se traduza num incremento da tensão máxima de aderência da ordem dos 15%, com uma redução do deslizamento que ronda os 18%.

Palavras-chave: aderência, perfil nervurado, zonas de ligação.

1. INTRODUÇÃO

O comportamento dos elementos de betão armado é fortemente condicionado pelo mecanismo de aderência aço-betão. Porém, na análise de estruturas de betão armado é

comum assumir-se uma aderência perfeita entre o aço e o betão, o que implica a compatibilidade de deformações entre os dois materiais. No entanto, esta hipótese só é válida para pequenos níveis de tensão e de deformação, uma vez que para níveis de tensão mais elevados ocorre fissuração e degradação da aderência, instalando-se deslocamentos relativos entre o aço e o betão (escorregamento/deslizamento das armaduras).

O fenómeno da perda de aderência assume maior relevância quando as estruturas de betão armado são sujeitas a ações severas, como é o caso particular da ação sísmica, uma vez que quando sujeitas a carregamentos cíclicos ou repetidos, as zonas de ancoragem sofrem uma progressiva degradação da aderência que poderá conduzir a uma rotura com tensões de aderência inferiores às tensões últimas obtidas em regime monotónico.

Por outro lado, o efeito de um carregamento cíclico é mais pertinente nas zonas das estruturas sujeitas a uma maior concentração de esforços, como é o caso dos nós de ligação. Nestas zonas, as vigas podem sofrer fendilhação nas secções junto ao pilar, mas a região afetada pela ação da aderência estende-se para o interior do nó, que não está aparentemente fendilhada, devido ao confinamento exercido pelo pilar e pelas vigas transversais que nele convergem.

Paralelamente sabe-se que no caso dos varões nervurados, a resistência ao deslizamento se deve principalmente, à resistência que o betão oferece às pressões exercidas sobre ele pelas nervuras, ou seja, à aderência mecânica entre o betão e as nervuras.

Sendo assim, pretende-se com este artigo apresentar os resultados, relativos à influência do perfil nervurado dos varões na relação tensão de aderência-deslizamento, obtidos num estudo de caracterização da aderência de varões nervurados sujeitos a ações repetidas e alternadas, desenvolvido no LNEC.

2. INFLUÊNCIA DA ÁREA RELATIVA DAS NERVURAS TRANSVERSAIS

No trabalho realizado por Eligehausen, Popov e Bertero [1] é feita a sistematização dos fatores que influenciam a aderência sob ações repetidas e alternadas e das consequências associadas ao fenómeno da perda de aderência. É referido no entanto que ficou em aberto a influência da geometria das nervuras, em especial a influência da distância entre nervuras e a sua altura, salientando mesmo que eram necessários ensaios adicionais que poderiam vir a justificar melhorias ao modelo analítico proposto.

Os diversos trabalhos de investigação [2], [3], [4] que entretanto foram desenvolvidos ao nível da influência das características do perfil nervurado, avaliam os efeitos da resistência do betão, o tipo e quantidade de agregados e a geometria das nervuras da armadura utilizada para avaliar o efeito da área relativa das nervuras (f_R) e da deterioração que existe na aderência quando são usadas armaduras com diferentes níveis de área relativa das nervuras, sendo a área relativa das nervuras o parâmetro que contabiliza o efeito da altura

das nervuras (a), espaçamento entre nervuras (c) e perímetro em que não existem nervuras transversais ($\sum f_i$).

Um dos estudos em questão [2] evidencia que, a uma maior área relativa das nervuras, estão associados menores deslizamentos em regime cíclico e, por isso considera que estudos mais aprofundados podem permitir concluir que os varões com maior área relativa das nervuras são mais adequados para melhorar o comportamento de elementos de betão armado, em especial nas zonas mais afetadas pela degradação da aderência como sejam as zonas de ligação.

Em 1993 um outro trabalho [4] debruçou-se sobre a avaliação dos efeitos da modificação da geometria das nervuras especialmente para tentar perceber até que ponto alterações do perfil nervurado podem ter influência nas tensões de aderência, nomeadamente através do ensaio de provetes constituídos por armaduras com diferentes combinações entre altura e espaçamento entre nervuras, com vista à obtenção de provetes com diferentes áreas relativas das nervuras. As principais conclusões apontam no sentido de que a resposta, em termos de aderência, é função da área relativa das nervuras, sendo independente da combinação entre altura e espaçamento, havendo também uma maior rigidez inicial na curva carga-deslizamento à medida que aumenta a área relativa das nervuras sob quaisquer condições de confinamento. Pelo contrário, sob condições de baixo confinamento, onde a rotura ocorre por fendimento do betão, os resultados demonstram que a aderência é independente da geometria das nervuras.

Um outro estudo [5] refere também critérios que podem conduzir a um dimensionamento de zonas de amarração e emendas mais realista e por conseguinte mais económico, propondo a existência de maiores comprimentos de amarração sempre que existem condições de baixo confinamento ou a redução dos referidos comprimentos para níveis mais elevados de confinamento, garantidos pela existência de recobrimento mais elevado de armadura transversal e de mais espaço entre os varões.

Mais recentemente Mayer [6] sistematizou a influência do perfil nervurado das armaduras no comportamento estrutural de elementos. Para além de uma abordagem exaustiva de diversas considerações relativas à influência da geometria do perfil nervurado nas condições de aderência ao nível da verificação de segurança nos estados limite últimos e de utilização, este trabalho descreve detalhadamente a importância que têm as diversas grandezas que conduzem à obtenção da área relativa das nervuras e que é o parâmetro que, na prática, se usa para controlar o desempenho dos varões nervurados em termos de aderência.

Os estudos paramétricos desenvolvidos por Mayer [6] para investigar a influência da área relativa das nervuras transversais conduziram a conclusões ao nível da verificação de segurança em relação ao estado limite de utilização e ao estado limite último e também ao nível das zonas de amarração e emenda de varões que se detalham nos pontos seguintes.

2.1 Ao nível do estado limite de utilização

A este nível, o deslizamento entre a armadura e o betão é reduzido, pelo que a abertura de fendas e a deformação dos elementos são principalmente governadas pelo ramo ascendente da curva tensão de aderência-deslizamento. Rehm [7] refere que, de acordo com os resultados dos ensaios da literatura, a rigidez inicial da relação tensão de aderência-deslizamento depende significativamente da área relativa das nervuras transversais. Em contrapartida, para uma área relativa das nervuras transversais constante, a altura, o espaçamento entre nervuras e a inclinação das nervuras relativamente ao eixo do varão e o ângulo das nervuras têm pouca influência. Portanto, para alcançar o desejável comportamento rígido da aderência é necessária elevada área relativa das nervuras transversais.

Mayer [6] refere que, de acordo com Rehm [7], um valor razoável da área relativa das nervuras é 0,070. O valor ótimo para a área relativa do perfil nervurado é dado por Noakowski [8] como estando entre 0,060 e 0,130. Para Kobuku e Okamura [9], a altura efetiva das nervuras deve estar entre 15 e 20% do espaçamento, ou seja c/a entre 8 e 10 e $a/c \approx 0,11 \approx f_R$. Para Soretz/Hölzenbein [10] é razoável ter um $f_R = 0,065$ obtido com uma altura de $0,025 \times d$ e espaçamento de $0,30 \times d$ ($c/a = 12$).

Os resultados obtidos em investigações numéricas relacionadas com a influência do f_R no valor médio da abertura de fendas em elementos de betão armado sujeitos a ações de curto prazo e carregamento contínuo podem ser resumidos da seguinte forma: a redução de f_R para valores abaixo dos regulamentares ($f_R = 0,040$) em vigas e em lajes armadas numa direção conduz a que a abertura de fendas seja 25 a 40% superior ao que se obtém com valores de f_R regulamentares, dependendo da percentagem de armadura. Por outro lado, com o aumento de f_R para 0,100 a abertura das fendas é 45% inferior àquela que se obtém com f_R regulamentar.

O aumento da resistência do betão entre C30/37 e C50/60 reduz a abertura de fendas em cerca de 15% mas, a influência de f_R permanece a mesma.

A variação da área relativa das nervuras transversais entre 0,04 e 0,100 não tem praticamente influência na deformação de vigas e lajes para ações de curto prazo e carregamento contínuo se a esbelteza dos elementos estiver entre 6 e 12.

Com a utilização de redes eletrossoldadas o espaçamento médio entre fendas é influenciado pela localização dos varões transversais e de acordo com os resultados obtidos por Eligehausen e Mayer [11] a influência da área relativa das nervuras é inferior a 10%.

Assim, a redução da área relativa das nervuras transversais conduz a uma maior abertura de fendas e portanto a sua redução é crítica em termos de estados limite de utilização, em especial quando são usados varões de maior diâmetro.

2.2 Ao nível do estado limite de último

Nos estados limite últimos a capacidade de rotação das rótulas plásticas e, por conseguinte, a capacidade dos sistemas estaticamente indeterminados, que não estão armados de acordo com uma distribuição elástica de esforços, para redistribuir os esforços internos é de especial interesse.

Definindo a rotação plástica como sendo a diferença entre a rotação total para a carga máxima, quando é atingido o momento de cedência, e a rotação elástica, Mayer [6] revela que até à data do seu estudo poucos foram os trabalhos que abordaram a influência da geometria das nervuras no desempenho, em termos de aderência, para extensões na armadura fora da zona elástica e portanto, sobre a capacidade de rotação das rótulas plásticas.

Um dos primeiros estudos sobre este assunto foi desenvolvido em 1991 por Bühler e Eibl [12] e refere-se a um programa experimental de ensaios de lajes armadas numa direção com redes eletrossoldadas constituídas por varões lisos e nervurados. Os resultados obtidos demonstram que, em condições idênticas, as lajes com varões lisos têm uma rotação plástica significativamente maior. Nas lajes idênticas, mas executadas com varões nervurados, as rotações plásticas medidas mostram uma grande dispersão.

Mayer [6] salienta que, de acordo com os trabalhos experimentais desenvolvidos por Tholen e Darwin [13], um aumento da área relativa das nervuras de 0,070 para 0,120 não tem grande influência no desempenho estrutural. Porém, nos ensaios realizados a rotura ocorreu por esmagamento do betão em compressão, pelo que a influência da área relativa das nervuras é, de qualquer forma, reduzida.

Os resultados dos cálculos realizados por Eligehausen e Mayer [11] mostram que, para varões de baixa ductilidade, uma pequena variação na forma da curva tensão-extensão (R_m/R_e de 1,05 para 1,06 e A_{gt} de 25‰ para 30‰) apresenta uma maior influência na capacidade de rotação plástica do que a variação da área relativa das nervuras transversais.

Dos estudos numéricos elaborados por Mayer [6] verifica-se que a influência da área relativa das nervuras transversais na rotação plástica é relevante apenas quando a percentagem de armadura é baixa, o que conduz à rotura da armadura. No caso de ser usado aço de maior ductilidade e com patamar de cedência, os resultados obtidos em vigas e lajes apontam para que a variação da área relativa das nervuras no intervalo entre 0,030 e 0,100 tenha uma influência na rotação plástica inferior a 20%. Por outro lado, quando se utiliza aço sem patamar de cedência com $f_R=0,100$ existe um incremento da rotação plástica em cerca de 30%. Se $f_R=0,030$ os resultados evidenciam uma redução da ordem dos 15%. O autor atribui este comportamento principalmente à modificação do espaçamento entre fendas devido à alteração da relação tensão de aderência-deslizamento e à influência das extensões da armadura em regime plástico no comportamento da aderência.

No caso de se usar redes eletrossoldadas, o espaçamento entre fendas é constante e, neste caso, um aumento da área relativa das nervuras conduz a uma redução da rotação plástica entre 15 e 20%, no intervalo de f_R entre 0,030 e 0,100 sendo independentemente da ductilidade do aço.

Os resultados descritos por Mayer [6] são válidos para varões em que o incremento da área relativa das nervuras é obtido através do aumento da altura das nervuras mantendo o espaçamento constante. Como os deslizamentos nas zonas das rótulas plásticas são elevados, a rotação é sobretudo influenciada pelo declive do ramo descendente da curva tensão de aderência-deslizamento na zona próxima à fenda. Se o declive for menos abrupto, a rotação plástica diminui e, se for mais abrupto, a rotação aumenta uma vez que a contribuição do betão muda. O autor salienta ainda que se consegue que o declive do ramo descendente seja abrupto reduzindo o espaçamento entre as nervuras.

Para elementos em que a formação de fendas não é significativamente influenciada pela existência de elevada armadura transversal, o aumento da área relativa das nervuras comparado com os valores mínimos conduz a maiores rotações plásticas independentemente da ductilidade do aço. O autor considera que este efeito se deve ao menor espaçamento entre fendas como consequência do aumento da área relativa das nervuras, havendo uma redução da contribuição do betão, apesar do aumento da tensão de aderência. Para se ter em conta as forças de fendimento, Mayer [6] aponta que se deve aumentar a área relativa das nervuras reduzindo o espaçamento entre nervuras mantendo a altura constante e aponta que, independentemente da ductilidade do aço, o estudo elaborado sugere ser possível que a relação entre o espaçamento e a altura das nervuras passe de 7 a 10 para 5 a 8.

Este trabalho salienta ainda que é expectável que exista uma redução da capacidade de rotação plástica com a redução da área relativa das nervuras transversais, pelo que uma redução deste tipo deve ser evitada, em especial nos aços de baixa ductilidade.

2.3 Nas zonas de amarração e emenda de varões

A rotura das zonas de ancoragem e das emendas pode, entre outros fatores, ser devida ao fendimento ou destacamento do betão de recobrimento. Na prática, para que o comprimento aderente necessário para que se desenvolva a força de cedência da armadura seja o mais curto possível, as forças de fendimento geradas por aderência entre a armadura e o betão devem ser o mais reduzidas possível.

Nesse sentido, a influência da área relativa das nervuras transversais foi já estudada por diversos investigadores. Em 1973, Martin [14] desenvolveu diversas simulações com elementos finitos em regime elástico e linear, variando a altura das nervuras transversais, e constatou que a maior área relativa das nervuras, mantendo o recobrimento constante, conduzia a tensões radiais mais elevadas que se traduziam no aumento do fendimento.

O estudo desenvolvido por Eligehausen em 1979 [15] referente a ensaios de emendas de varões nervurados com pontas retas, permitiu concluir que no intervalo entre 0,050 e 0,100, a influência da área relativa das nervuras transversais no modo de rotura é reduzida e, em 1996 Darwin [16] confirmou esta afirmação.

Os resultados dos ensaios de arrancamento realizados por Tepfers e Olsson [17] e posteriormente também por Cairns e Jones em 1995 [18] revelam que varões com maior área relativa das nervuras transversais causam menores forças de fendimento para tensões de aderência constantes.

Tendo em conta o tipo de rotura que ocorre no betão entre as nervuras, Rehm [7] constatou que as forças de fendimento são tanto maiores quanto menor for a relação entre o espaçamento e a altura das nervuras. Para a mesma área relativa das nervuras transversais, os ensaios de arrancamento realizados por Kokubu e Okamura [9] e por Soretz e Hölzenbein [10] também confirmam que as forças de fendimento dependem da altura e do espaçamento entre nervuras.

O estudo de Goto e Otsuka [19] [15] realizado em elementos de betão armado tracionados e a avaliação de resultados dos ensaios de emendas com pontas retas realizados por Eligehausen [15] confirmaram que, proporcionalmente, varões com menor altura das nervuras e menor espaçamento conduzem a menores forças de fendimento em comparação com varões com maior altura e maior espaçamento. Os estudos numéricos desenvolvidos por Eligehausen e Mayer em 2000 [11] apontam para que, no intervalo entre 0,050 e 0,200, a influência da área relativa das nervuras em termos de fendimento seja reduzida.

Os resultados da literatura compilados por Mayer [6] indicam que a inclinação das nervuras em relação ao eixo do varão (β) e inclinação da face das nervuras (α) têm pouca influência no fendimento.

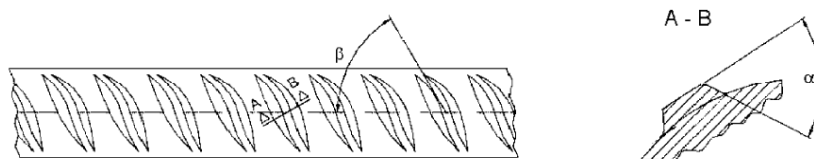


Figura 1 – Representação esquemática das inclinações α e β .

Os estudos numéricos realizados pelo autor [6] sobre a influência da área relativa das nervuras transversais no comprimento de amarração de varões retos apontam para que, para roturas por arrancamento, uma maior área relativa das nervuras diminui o comprimento de amarração e consegue-se uma redução do comprimento de amarração necessário se as condições de aderência forem melhoradas. Se a área relativa das nervuras for constante, a alteração da altura ou do espaçamento não tem influência no comprimento de amarração.

Mayer [6] refere, a título exemplificativo, que uma redução da área relativa das nervuras em varões de 8 mm (colocados na horizontal e com boas condições de aderência), de 0,045

(valor mínimo) para 0,030 leva a um aumento de 50% do comprimento de amarração. Nestas condições, se os varões estiverem na vertical, o comprimento de amarração aumenta 25%. No caso de se aumentar a área relativa das nervuras relativamente ao valor mínimo, consegue-se uma redução de 30% do comprimento de amarração se $f_R=0,060$ e de 50% se $f_R=0,080$.

Em condições semelhantes, o estudo [6] conclui que a influência da área relativa das nervuras na relação entre o comprimento aderente e o diâmetro se mantém constante e que o aumento da área relativa das nervuras tem o mesmo efeito em termos de escorregamento e em termos de comprimento de amarração.

Se for empregue armadura transversal para prevenir o fendimento, a influência da área relativa das nervuras, mantendo o recobrimento constante é a que se descreve nos próximos parágrafos. Se a área relativa das nervuras for baixa é suficiente uma reduzida quantidade de armadura transversal para alterar o modo de rotura de fendimento para arrancamento. Na gama de valores da área relativa das nervuras transversais estudados, à medida que se aumenta a quantidade de armadura transversal, o comprimento de amarração diminui. Com o aumento da quantidade de armadura transversal, a relação entre o comprimento de amarração correspondente à área relativa das nervuras em causa e o comprimento de amarração correspondente à área relativa das nervuras mínima aumenta se o valor da área relativa das nervuras for menor que o mínimo e aumenta quando a área relativa é superior à mínima. Assim, Mayer [6] considera que o aumento ou a redução da área relativa das nervuras só é relevante quando a armadura transversal é reduzida, uma vez que a forte influência da armadura transversal com o aumento da área relativa das nervuras se deve ao aumento do efeito de fendimento e, portanto numa maior necessidade de mobilizar a armadura transversal. Um aumento do diâmetro ou da resistência do betão não alteram significativamente a influência da área relativa das nervuras transversais.

Mencionando outros autores, Mayer [6] refere ainda que os resultados descritos na literatura mostram que, se a força de tração imposta for constante, a força de fendimento não é significativamente influenciada pela variação da área relativa das nervuras transversais entre 0,050 e 0,200. Assim, quando as forças de fendimento são baixas, é favorável ter um espaçamento entre nervuras mais reduzido para que a rotura ocorra por corte ao longo do comprimento de amarração do varão.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL E RESULTADOS OBTIDOS

O programa experimental desenvolvido com o intuito de aferir, entre outras variáveis, a influência da maior área relativa das nervuras transversais, encontra-se detalhadamente descrito num artigo publicado em 2012 [1].

De qualquer forma, salienta-se que os provetes foram concebidos para simular as condições de aderência existentes num varão horizontal de uma ligação viga-pilar e tem como principais variáveis varões de dois diâmetros frequentemente utilizados (16 e 25 mm), dois

níveis diferentes de área relativa das nervuras transversais (A/AT e B/BT) e duas classes de betão (C1 e C2), ambos representativos do betão utilizado nas construções mais relevantes (ver Figura 2). Os lotes AT e BT representam provetes dos lotes A e B sujeitos a um tratamento térmico que não é relevante para a avaliação da influência das nervuras transversais.

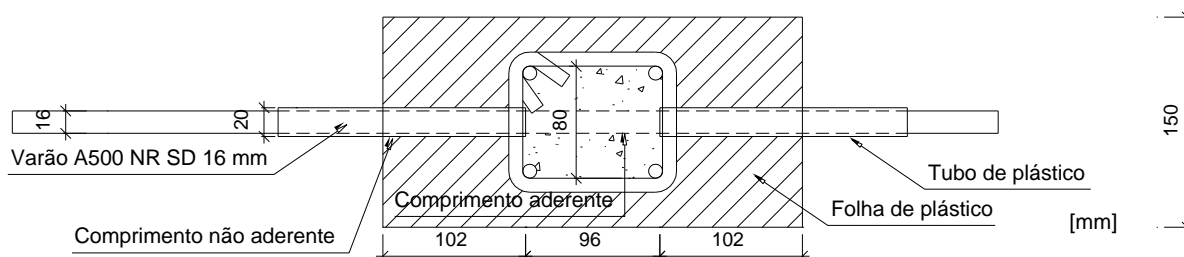


Figura 2 – Características gerais dos provetes com varões de 16 mm: vista superior.

Relativamente aos lotes A e B a diferença reside na área relativa das nervuras transversais, sendo que para os varões de 16 mm de diâmetro, o lote B é aproximadamente 23% superior ao lote A, conforme se pode constatar pelos resultados do Quadro 1. No caso dos varões de 25 mm de diâmetro a diferença é pouco significativa, rondando os 5%.

Quadro 1 – Características geométricas das nervuras dos varões em estudo.

Varões		a (mm)	c (mm)	Σf_i (mm)	f_R
16 mm	A	1,29	10,0	3,2	0,081
	AT	1,28	10,0	3,8	0,080
	B	1,58	9,9	3,8	0,099
	BT	1,59	9,9	4,2	0,098
25 mm	A	2,22	14,4	5,7	0,096
	AT	2,27	14,4	6,4	0,097
	B	2,41	14,5	6,9	0,101
	BT	2,41	14,5	7,1	0,101

Para avaliar o desempenho dos provetes com diferentes níveis de área relativa das nervuras transversais, realizaram-se ensaios monotónicos e também diversos tipos de ensaios cíclicos. Neste artigo detalham-se os resultados obtidos para os ensaios cíclicos Tipo 1, nos quais foram impostos 10 ciclos com níveis de deslizamento alternados, inferiores ao deslizamento médio obtido para a tensão de aderência máxima, para cada conjunto de provetes de arrancamento com as mesmas características.

3.1 Resultados obtidos em regime monotónico

Ao nível da influência da maior área relativa das nervuras transversais, os resultados médios obtidos em termos de tensão máxima de aderência e respetivo deslizamento para os

provetes A e B_C1_16 estão de acordo com o previsto, ou seja uma maior área relativa das nervuras transversais traduz-se numa maior tensão máxima de aderência (ver Figura 3).

Tal como já tinha sido referido anteriormente, no caso dos varões de 25 mm (A e B_C1_25), a diferença de área relativa das nervuras transversais é muito pouco significativa ($\pm 5\%$) e, portanto, existe uma ligeira inversão da relação entre a tensão máxima de aderência e a área relativa das nervuras transversais. Tendo em conta que foram realizados ensaios adicionais para confirmar os resultados inicialmente obtidos, considera-se que os resultados obtidos podem estar associados aos resultados do betão ou ao fator maior diâmetro.

No betão de maior resistência verifica-se que nos provetes B_C2_16 foi possível atingir a cedência da armadura e, mesmo assim, a tensão máxima de aderência é praticamente igual à dos provetes com menor área relativa das nervuras transversais, o que deixa antever a possibilidade de a tensão máxima de aderência poder ser superior, caso a cedência da armadura não tivesse ocorrido. Esta constatação vai também de encontro aos resultados obtidos para o betão de menor resistência.

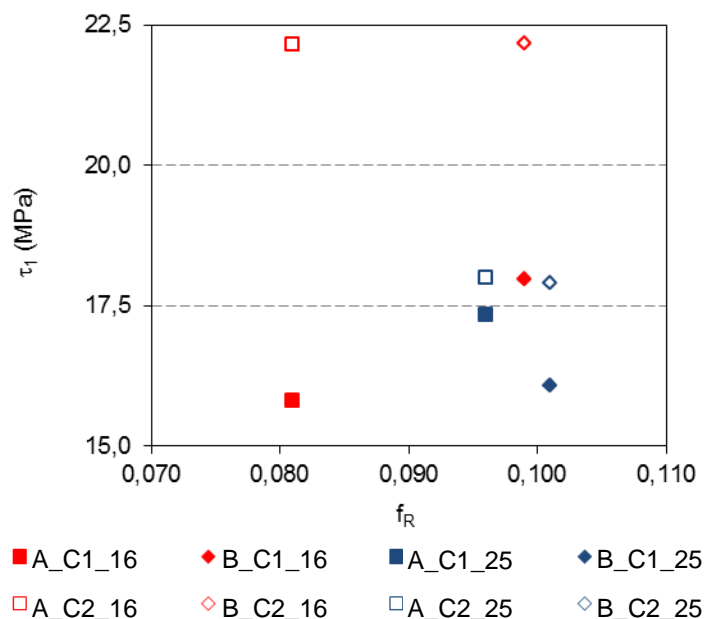


Figura 3 – Influência da área relativa das nervuras transversais (f_R) na tensão máxima de aderência (τ_1), obtida nos ensaios em regime monotónico.

3.2 Resultados obtidos em regime cíclico

Tal como seria de prever, em face dos estudos já realizados para a influência da área relativa das nervuras transversais [3], o aumento deste parâmetro traduz-se num aumento menos significativo da tensão máxima de aderência nos varões de 25 mm de diâmetro, em ambos os betões (Figura 4).

No caso dos varões de 16 mm, a redução da tensão máxima de aderência devida à imposição da ação cíclica alternada é da mesma ordem de grandeza para ambos os lotes A

e B (13%), sendo de salientar que o acréscimo da tensão máxima de aderência entre os lotes é da ordem dos 15%, com uma redução do deslizamento que ronda os 18%.

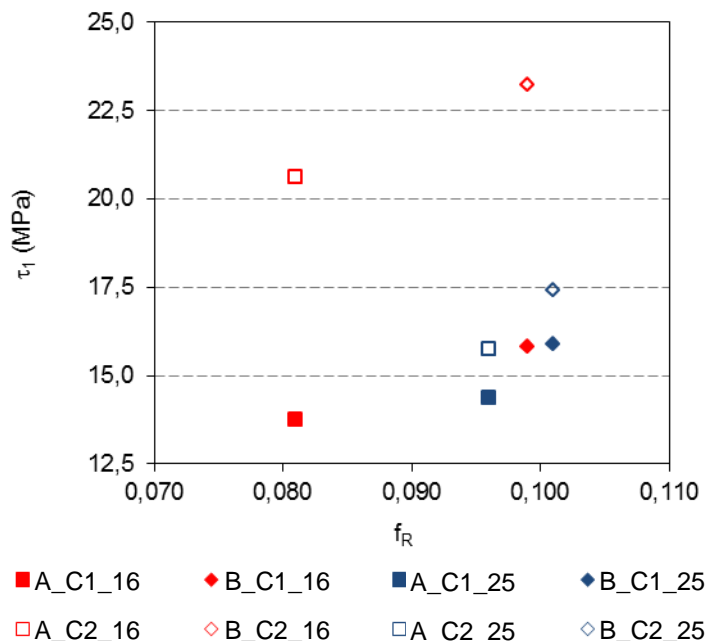


Figura 4 – Influência da área relativa das nervuras transversais (f_R) na tensão máxima de aderência (τ_1), obtida nos ensaios cíclicos do Tipo 1.

Analisando em particular os resultados obtidos nos ensaios cíclicos realizados num conjunto de 17 provetes de betão de menor resistência, com varões do lote A (9 provetes) e do lote B (8 provetes) obtém-se o andamento médio da relação tensão de aderência-deslizamento de cada conjunto que se ilustra na Figura 5 e na Figura 6 respetivamente, sendo de salientar que foi excluído o provete B_C1_16_4 por apresentar um comportamento muito díspar dos restantes (ver Figura 6).

Para além do menor deslizamento e da maior tensão máxima de aderência, o andamento médio obtido para ambos os lotes (A e B) evidencia uma maior rigidez do ramo ascendente da relação tensão de aderência-deslizamento nos provetes do lote B, o que é compatível com os resultados dos trabalhos existentes sobre varões com maior área relativa das nervuras transversais (ver Figura 7).

Dado que nos ensaios cíclicos não é possível quantificar a tensão de aderência média da forma como esta se encontra formalmente definida para os ensaios em regime monotónico, uma vez que os ciclos de deslizamento imposto se encontram claramente acima de 0,01 mm e 0,1 mm, optou-se por calcular uma tensão de aderência média para os ensaios cíclicos ($\tau_{m,c}$) a partir da tensão de aderência correspondente a deslizamentos da ordem dos 0,30 mm, 0,50 mm e 1,0 mm, uma vez que 0,30 mm é o valor mais elevado de deslizamento imposto nos ensaios deste tipo.

Assim consegue-se comparar de forma indireta a rigidez do ramo ascendente da relação tensão de aderência-deslizamento dos provetes dos lotes A e B em betão de resistência normal, uma vez que é possível constatar que, no ramo ascendente, entre os dois lotes, existe uma variação desta tensão de aderência média que ronda os 30% e que é particularmente evidente nas Figuras 5 a 8.

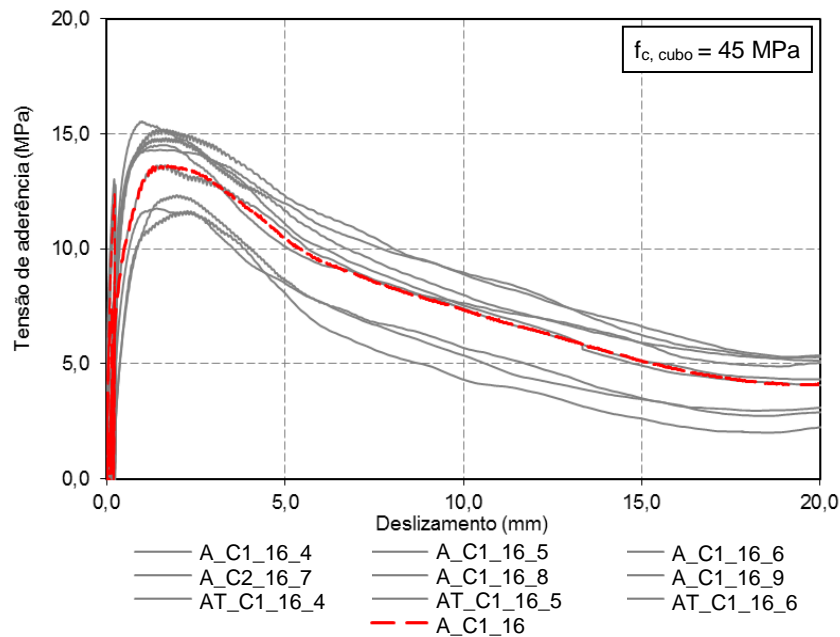


Figura 5 – Ensaio cíclico do Tipo 1: resultados obtidos nos provetes de 16 mm dos lotes A e AT em betão de menor resistência.

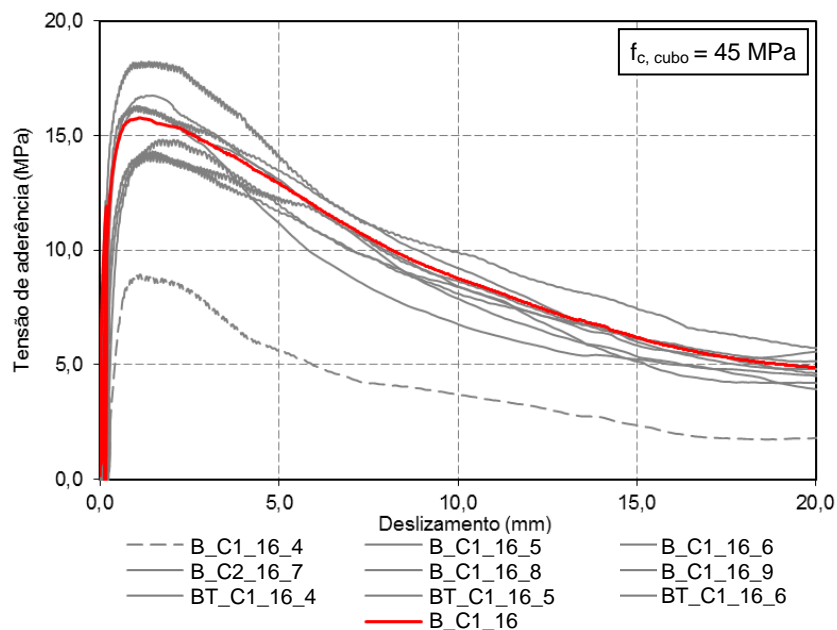


Figura 6 – Ensaio cíclico do Tipo 1: resultados obtidos nos provetes de 16 mm dos lotes B e BT em betão de menor resistência.

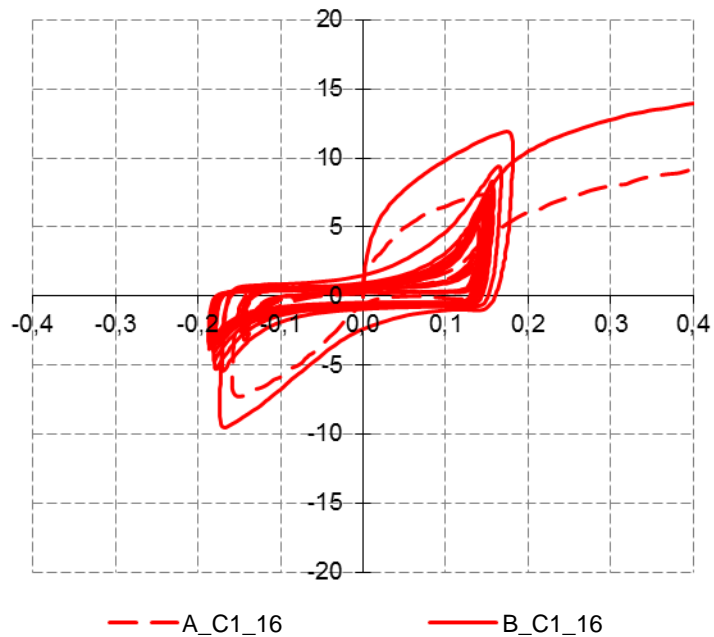


Figura 7 – Ensaio cíclico do Tipo 1: detalhe dos resultados médios obtidos nos provetes de 16 mm dos lotes A, AT, B e BT em betão de menor resistência.

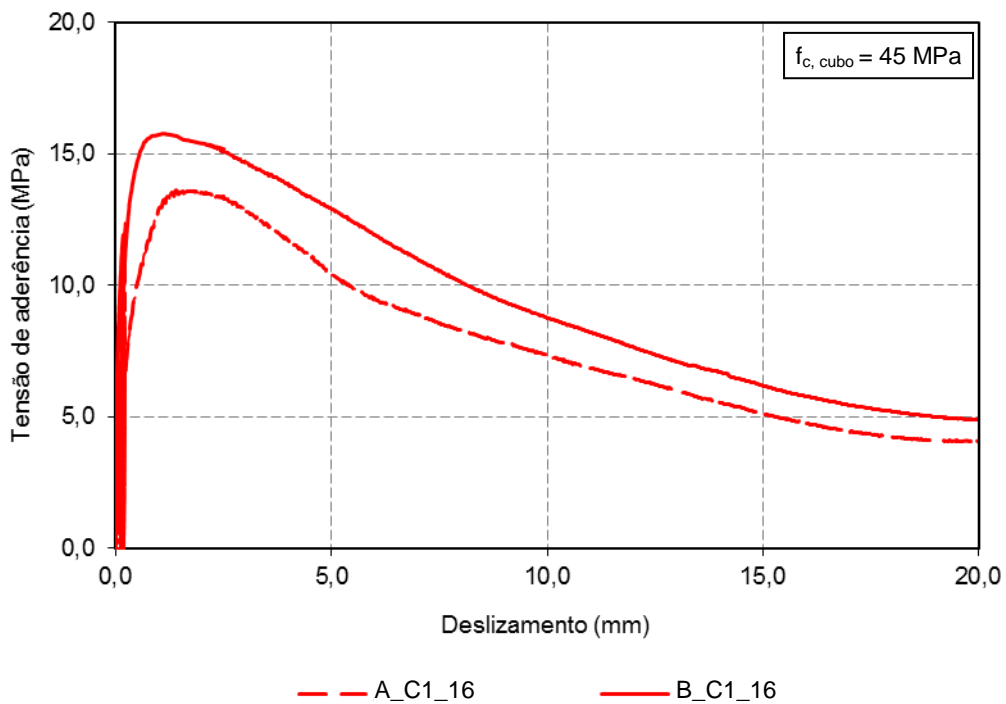


Figura 8 – Ensaio cíclico do Tipo 1: resultados médios obtidos nos provetes de 16 mm dos lotes A, AT, B e BT em betão de menor resistência.

Quadro 2 – Tensão de aderência média em regime cíclico, dos lotes A e B em betão de menor resistência.

Provetes	s (mm)	τ (MPa)	$\tau_{m,c}$ (MPa)	Provetes	s (mm)	τ (MPa)	$\tau_{m,c}$ (MPa)
A_C1_16_4	0,30	3,7	6,7	-	-	-	-
	0,49	5,6			-	-	
	1,02	10,7			-	-	
A_C1_16_5	0,30	9,8	12,2	B_C1_16_5	0,30	8,7	11,4
	0,50	12,8			0,50	11,7	
	1,01	14,2			1,00	13,6	
A_C1_16_6	0,30	8,5	11,8	B_C1_16_6	0,30	5,9	10,1
	0,50	12,2			0,49	10,7	
	1,01	14,7			1,01	13,7	
A_C1_16_7	0,30	9,6	12,2	B_C1_16_7	0,30	15,0	16,7
	0,49	12,5			0,49	16,8	
	1,01	14,4			1,01	18,2	
A_C1_16_8	0,30	3,7	7,2	B_C1_16_8	0,31	10,0	12,1
	0,50	7,1			0,50	12,3	
	1,02	10,6			1,01	13,9	
A_C1_16_9	0,30	8,0	10,3	B_C1_16_9	0,30	13,1	14,9
	0,50	10,1			0,50	15,3	
	1,01	12,9			1,02	16,3	
AT_C1_16_4	0,30	10,5	13,2	BT_C1_16_4	0,30	12,8	14,4
	0,50	13,7			0,49	14,7	
	1,02	15,5			1,01	15,7	
AT_C1_16_5	0,30	9,1	11,9	BT_C1_16_5	0,30	12,0	14,3
	0,49	12,4			0,50	14,7	
	1,03	14,3			1,01	16,2	
AT_C1_16_6	0,30	6,0	8,8	BT_C1_16_6	0,30	12,3	14,6
	0,50	8,9			0,50	14,9	
	1,01	11,6			1,01	16,6	
	<i>Valor médio</i>		10,5		<i>Valor médio</i>		13,5

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos em regime monotónico permitem concluir que nos provetes de 16 mm, o aumento da área relativa das nervuras transversais se traduz num incremento da tensão máxima de aderência da ordem dos 15%, com uma redução do deslizamento que ronda os 15%. Este facto conduz a que o ramo ascendente da relação tensão de aderência-deslizamento seja mais rígido.

Em regime cíclico, a influência da área relativa das nervuras transversais, avaliada através dos ensaios realizados nos varões de 16 mm, permite concluir que a redução da tensão máxima de aderência devida à imposição da ação cíclica alternada é da mesma ordem nos provetes com maior e menor área relativa das nervuras transversais (13%). Porém destaca-se que existe um acréscimo da tensão máxima de aderência entre os lotes A e B da ordem dos 15% e que existe uma redução do deslizamento correspondente à tensão de aderência máxima que ronda os 18%.

Nos ensaios cíclicos, o andamento médio da relação tensão de aderência - deslizamento obtido evidencia também uma maior rigidez do ramo ascendente da relação tensão de aderência-deslizamento nos provetes com maior área relativa das nervuras transversais, o que é compatível com os resultados obtidos em regime monotónico.

Portanto, os resultados obtidos, sendo concordantes com os da literatura da área, permitem concluir que pode haver benefício na seleção deste material para utilização em estruturas ou elementos estruturais nos quais se pretende um melhor desempenho, desde que seja prevista a utilização de armadura de confinamento suficiente.

REFERÊNCIAS

- [1] Eligehausen, R.; Popov, E. P. e Bertero, V V.; Local Bond Stress-Slip Relationships of Deformed Bars Under Generalized Excitations; Report No UCB/EERC-83/23; Earthquake Engineering Research Center; University of California; Berkeley; California; October 1983.
- [2] Zuo, J. e Darwin, D.; Bond Slip of High Relative Area Bars Under Cyclic Loading; ACI Structural Journal; 97-S37; pp. 331–334; 2000.
- [3] Darwin, D.; Zuo, J.; Tholen, M.L. e Idun, E.K.; Development Length Criteria for Conventional and High Relative Rib Area Reinforcing Bars; ACI Structural Journal; 93-S32; pp. 347–359; 1996.
- [4] Darwin, D. e Graham, E.K.; Effect of Deformation Height and Spacing on Bond Strength of Reinforcing Bars; ACI Structural Journal; 90-S65; pp. 646–657; 1993.
- [5] Darwin, D.; Idun, E.K. e Zuo, J.; Recommended Provisions and Commentary on Development and Lap Splice Lengths for Deformed Reinforcing Bars in Tension; ACI Structural Journal; 102-S91; pp. 892-900; 2005.
- [6] Mayer, Utz; Influence of the Rib Pattern of Ribbed Reinforcement on the Structural Behaviour of Reinforced Concrete Members; PhD Thesis; Institute für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, Stuttgart; Germany; 2001.
- [7] Rehm, G.; Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton; Nr. 138; Vertrieb durch Verlag von W. Ernst; Berlin; Germany; 1961.

- [8] Noakowski, P.; Einfluß der Profilierung und des Betons auf die Verbundqualität von Stahl in Beton. Lehrstuhl und Institut für Massivbau; TU München, Aus unseren Forschungsarbeiten III; Germany; 1973.
- [9] Kokubu, M. e Okamura, H.; Influences of surface configurations of reinforcement on bond between concrete and reinforcement. - In: „Fukugo Zairyo Kenkyu; Composite Materials & Structures Vol. 3; No. 4; pp. 1 – 6; 1974.
- [10] Soretz, S. e Hölzenbein, H.; Einfluß der Rippenabmessungen von Beton-Bewehrungsstäben auf den Verbund und die Biegefähigkeit. Betonstahl in Entwicklung TOR-ISTEG STEEL-Corporation; Heft 69; Germany; 1980.
- [11] Eligehausen, R. e Mayer, U.; Untersuchungen zum Einfluß der bezogenen Rippenfläche von Bewehrungsstäben auf das Tragverhalten von Stahlbetonbauteilen im Gebrauchs- und Bruchzustand, Schriftenreihe des DAfStb; Heft 503, Beuth Verlag, Berlin; Germany; 2000.
- [12] Bühler, A. e Eibl, J.; Untersuchung des Einflusses verschiedener Stahlparameter auf die mögliche plastische Rotation bei Stahlbetonplatten; Versuchsbericht; Institut für Massivbau und Baustofftechnologie; Universität Karlsruhe; 1991.
- [13] Tholen, M. L. e Darwin, D.; Effect of reinforcing bar deformation pattern on flexural ductility. – In: ACI Structural Journal, V. 95, No. 1; pp. 37 – 42; 1998.
- [14] Martin, H.; Zusammenhang zwischen Oberflächenbeschaffenheit, Verbund und Sprengwirkung von Bewehrungsstählen unter Kurzzeitbelastung; Schriftenreihe des DAfStb, Heft 228; Verlag Wilhelm Ernst & Sohn; Berlin; Germany; 1973.
- [15] Eligehausen, R.; Übergreifungsstöße zugbeanspruchter Rippenstäbe mit geraden Stabenden; Schriftenreihe des DAfStb, Heft 301; Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin; Germany; 1979.
- [16] Darwin, D.; Tholen, M.L.; Idun, E.K. e Zuo, J.; Splice Strength of High Relative Rib Area Reinforcing Bars; ACI Structural Journal; 93-S10; pp. 95–107; 1996.
- [17] Tepfers, R. e Olsson, P.A.; Ring test for evaluation of bond properties of reinforcing bars; Proceedings of International Conference: Bond in Concrete, from Research to Practice; CEB-RTU, Riga; Volume 1; pp. 1-89; Latvia; 1992.
- [18] Cairns, J. e Jones, K.; Influence of rib geometry on strength of lapped joints – an experimental and analytical study; Magazine of Concrete Research; Vol. 47, No. 172; pp. 253 - 262; 1995.
- [19] Goto, Y. e Otsuka, K.; Experimental Studies on Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars – Reprinted from The Technology Reports of Tohoku University; Vol. 44, No. 1; pp. 49 – 83; 1979.
- [20] Louro, Ana S.; Pipa, Manuel ; "Caracterização da aderência de varões nervurados sujeitos a ações repetidas e alternadas", Encontro Nacional Betão Estrutural 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Porto, Outubro 2012.